

# **SIMULAZIONE DELLA FRATTURA DI GIUNTI INCOLLATI CON UN MODELLO DI ZONA COESIVA**

A. Pirondi, G. Nicoletto, G. Baruffaldi

*Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma  
Parco Area delle Scienze - 181/A, 43100 Parma, Italia  
[pirondia@me.unipr.it](mailto:pirondia@me.unipr.it)      [nick@me.unipr.it](mailto:nick@me.unipr.it)*

## **ABSTRACT**

The failure of bonded joints can be successfully modeled with the fracture mechanics approach since they generally show a number of defects generated: i) during bonding process, ii) due to environmental degradation and, iii) due to stress concentrations at the edges of the bonded area.

In this work, the fracture of bonded DCB (Double Cantilever Beam) joints has been modeled by Finite Elements (FE) using a CZM (Cohesive Zone Model). According to this model, the fracture occurs progressively along a strip in front of the physical crack tip (cohesive zone) following a predefined stress-opening law. The cohesive zone has been implemented into the FE model by substituting the adhesive with a series of nonlinear springs. The results of the FE simulations are discussed with respect to the results of fracture tests on DCB specimens.

## **SOMMARIO**

Il cedimento dei giunti incollati si può affrontare con successo seguendo un approccio di meccanica della frattura, in quanto essi presentano normalmente una certa quantità di difetti generatisi: i) durante l'operazione d'incollaggio, ii) a seguito di effetti ambientali e, iii) nelle zone di estremità del giunto dove si ha una concentrazione di tensione.

In questo lavoro si è simulata con il metodo degli Elementi Finiti (EF) l'evoluzione della frattura in giunzioni incollate di tipo DCB (Double Cantilever Beam) utilizzando un modello di zona coesiva (Cohesive Zone Model, CZM). Secondo questo modello, la separazione avviene progressivamente in una zona di materiale davanti all'apice del difetto (zona coesiva) seguendo una legge tensione-apertura predefinita. La zona coesiva è stata introdotta nel modello EF sostituendo lo strato adesivo con una serie di molle non lineari. I risultati delle simulazioni sono discussi in relazione a quelli ottenuti sperimentalmente in precedenti esperienze.

## **INTRODUZIONE**

L'utilizzo degli adesivi come metodo di collegamento e sigillatura presenta potenzialmente molteplici vantaggi rispetto a soluzioni tradizionali in ambito industriale (viti, rivetti, saldatura, ...), quali maggior compattezza, minor peso, migliore distribuzione degli sforzi, maggiore rapidità di assemblaggio [1].

Per contro, la giunzione incollata presenta alcune potenziali sorgenti di difetti: i) l'operazione d'incollaggio (contaminazione delle superfici, imperfetta adesione, intrappolamento di vuoti, fessurazioni durante la polimerizzazione); ii) effetti ambientali che favoriscano il distacco aderendo-adesivo (assorbimento di umidità, agenti chimici); iii) concentrazione di tensione nelle zone di estremità del giunto dovuta al trasferimento di carico e/o ad incompatibilità delle deformazioni tra aderendo e strato adesivo [2].

Per questo motivo la meccanica della frattura sta entrando sempre più profondamente anche nella progettazione e verifica delle giunzioni incollate [3, 4]. L'evoluzione della frattura in giunzioni incollate in cui il difetto rimane confinato nello strato adesivo è stata recentemente simulata attraverso modelli di zona coesiva (Cohesive Zone Models, CZM) [5-11] in cui la separazione avviene progressivamente in una zona di materiale davanti all'apice del difetto, detta appunto zona coesiva, seguendo una predefinita legge tensione-apertura (Fig. 1).

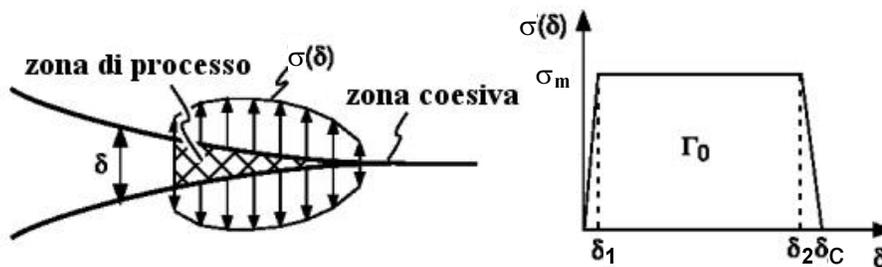


Fig. 1: schematizzazione della zona coesiva all'apice ed esempio di una possibile legge tensione-apertura.

Nel caso di Fig. 1 la tensione all'interfaccia aumenta progressivamente con l'entità della separazione all'interfaccia fino al raggiungimento di un massimo, quindi si stabilizza, e successivamente decresce fino ad azzerarsi in corrispondenza della completa decoesione. All'aumentare del carico, la zona coesiva avanza lasciando dietro di sé nuove superfici di frattura.

L'area sottesa dalla legge tensione-apertura rappresenta il lavoro di separazione  $\Gamma_0$ . Nel caso rappresentato in Fig. 1 l'altra variabile indipendente è la massima tensione  $\sigma_m$  o la massima apertura  $\delta_c$ , oltre ai rapporti  $\delta_1/\delta_c$  e  $\delta_2/\delta_c$ .

Il presente lavoro ha come obiettivo la simulazione agli elementi finiti del processo di frattura in un giunto incollato di tipo DCB utilizzando un modello di zona coesiva (CZM). Lo strato adesivo è stato modellato con una serie di molle non lineari per introdurre il legame tensione-apertura della zona coesiva. I risultati delle simulazioni sono discussi in relazione a quelli ottenuti sperimentalmente in precedenti esperienze [12].

## METODOLOGIA

### Simulazione EF

L'analisi agli elementi finiti è stata condotta utilizzando il software di calcolo Abaqus®. Il giunto di tipo DCB oggetto della modellazione è schematizzato in Fig. 2 e corrisponde a quello usato in [12].

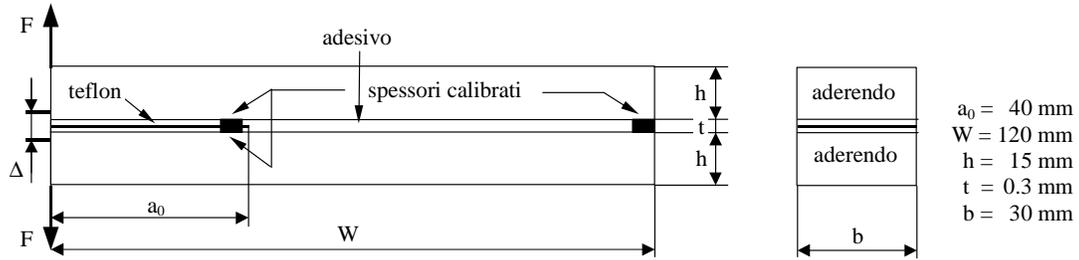


Fig. 2: geometria del provino DCB simulato.

Il modello EF utilizzato è rappresentato in Fig. 3. Le condizioni di simmetria hanno permesso di modellarne una metà. L'aderendo è stato discretizzato con elementi solidi lineari a quattro nodi a cui sono stati posti i vincoli illustrati in Fig. 3. La discretizzazione prevede una spaziatura regolare dei nodi con un passo di 1mm in orizzontale e di 1.5mm in verticale. La simulazione è stata condotta imponendo lo spostamento  $\Delta$  del punto di applicazione del carico.

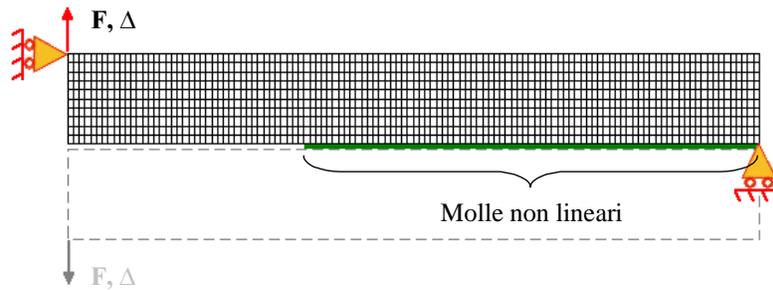


Fig. 3: modello EF.

La zona coesiva è stata introdotta nel modello EF, collegando i nodi dell'aderendo nella zona dell'interfaccia con l'adesivo ad altrettante molle a caratteristica non lineare, a loro volta vincolate a terra. Questo tipo di approccio, che non contempla esplicitamente lo spessore dell'adesivo, ha già trovato applicazione nella modellazione della frattura di interfacce bimateriali [6].

#### Leggi coesive utilizzate

La caratteristica forza-apertura della molla è stata imposta in modo da simulare una legge coesiva di tipo triangolare (Fig. 4a) o trapezoidale (Fig. 4b). In entrambi i casi gli spostamenti negativi (compenetrazione) sono stati limitati imponendo una rigidità delle molle a compressione tre ordini di grandezza superiore a quella del tratto iniziale a trazione.

I parametri della legge coesiva triangolare sono legati tra loro da una semplice relazione

$$\Gamma_0 = \frac{1}{2} \sigma_m \delta_c \quad (1)$$

mentre la sua forma è definita attraverso il rapporto  $c = \delta_1 / \delta_c$ . Nel caso della legge trapezoidale vale la seguente relazione:

$$\Gamma_0 = \frac{1}{2} \sigma_m [\delta_c + \delta_2 - \delta_1] \quad (2)$$

in cui  $\delta_1$  e  $\delta_2$  sono espressi attraverso i loro rapporti  $c_1 = \delta_1 / \delta_c$  e  $c_2 = \delta_2 / \delta_c$ .

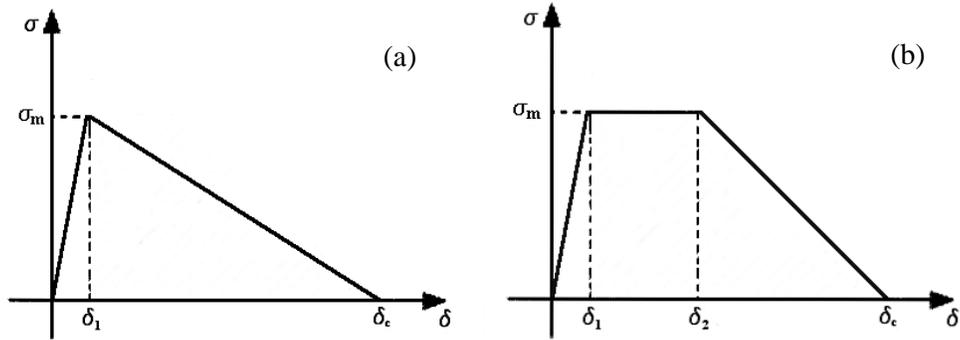


Fig. 4: leggi coesive utilizzate: triangolare (a); trapezoidale (b).

## RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

I risultati delle simulazioni EF sono presentati in termini di curve di forza-apertura di cricca ( $F-\Delta$ ) al variare dei parametri delle leggi coesive.

Si è condotta un'analisi parametrica fissando il valore di  $\Gamma_0$ , preso pari a  $G_{Ic} = 383 \text{ J/m}^2$  determinato sperimentalmente in [13].

### Influenza di $\sigma_m$

Facendo riferimento agli studi condotti in [6] ed in [7], si è posto inizialmente  $c = 0.01$  nel caso della legge triangolare e  $c_1 = 0.15$ ,  $c_2 = 0.85$  nel caso della legge trapezoidale. Quindi si sono condotte una serie di simulazioni al variare di  $\sigma_m$  i cui risultati sono riportati nelle Figg. 5 e 6. I valori di  $\sigma_m$  sono stati scelti nel campo di valori tipici di resistenza a trazione di giunzioni strutturali incollate.

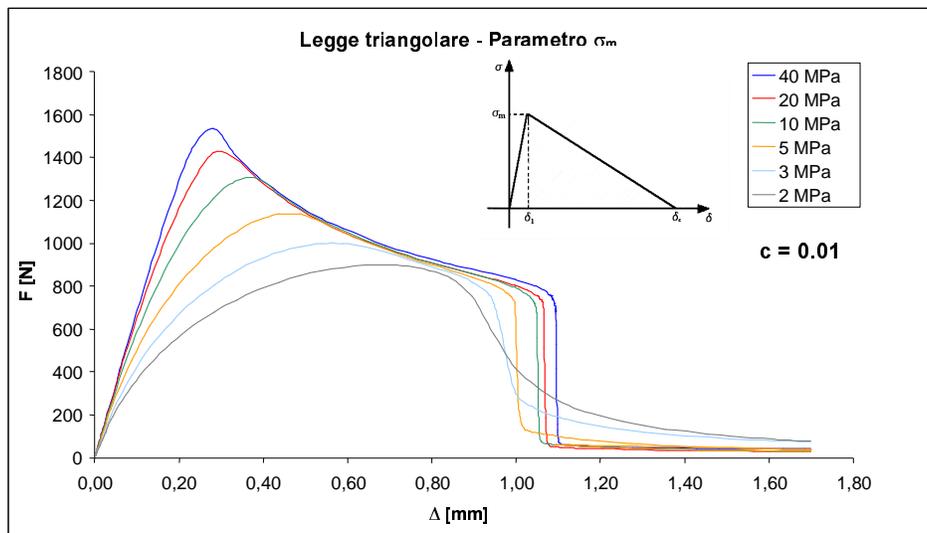


Fig. 5: risultati delle simulazioni con la legge triangolare al variare di  $\sigma_m$ .

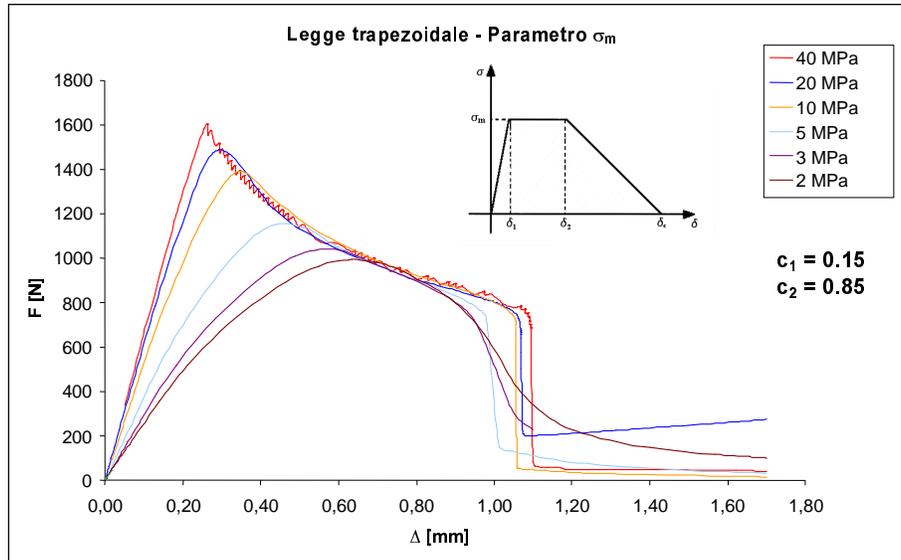


Fig. 6: risultati delle simulazioni con la legge trapezoidale al variare di  $\sigma_m$ .

Il comportamento dei due tipi di legge coesiva risulta simile, e cioè: i) all'aumentare di  $\sigma_m$  aumenta sia la pendenza del tratto iniziale che il valore di picco della forza, essendo le molle più rigide e resistenti; ii) per  $\sigma_m$  superiori ai 5MPa la forza diminuisce dopo il picco prima progressivamente (propagazione stabile) e poi repentinamente (propagazione instabile) in corrispondenza di un'apertura di 1-1.1mm.

Si può notare infine come le curve F- $\Delta$  presentino praticamente gli stessi valori di picco ( $F_{max}$ ,  $\Delta_{Fmax}$ ) nei due modelli.

#### *Influenza della forma della legge coesiva ( $c$ , $c_1$ , $c_2$ )*

Le analisi sono state condotte facendo variare  $c$ , nel caso della legge triangolare e  $c_1$ ,  $c_2$  nel caso della legge trapezoidale per ciascuno dei valori di  $\sigma_m$  simulati in precedenza. Nelle Figg. 7 e 8 vengono mostrati per brevità solamente i risultati relativi ad una  $\sigma_m = 20\text{MPa}$ , che comunque sono rappresentativi in generale dell'influenza della forma della legge coesiva sulle curve forza-apertura.

Nel caso della legge triangolare (Fig. 7) l'influenza del parametro  $c$  è limitata e visibile solo nel caso estremo di  $c = 0.95$ . In questo caso la pendenza del tratto iniziale è la stessa degli altri casi, quindi l'influenza sulla cedevolezza iniziale del giunto è limitata. Tuttavia la fase di propagazione avviene ad un valore di forza superiore mediamente del 20% rispetto agli altri casi e la separazione completa del giunto si ha per un'apertura  $\Delta = 1.3\text{mm}$  invece di 1.1mm.

Anche la legge trapezoidale (Fig. 8) risente in misura limitata dei valori di  $c_1$ ,  $c_2$ , che sono stati scelti in modo da avere in ogni caso una base minore del trapezio pari a ca. un terzo della base maggiore. In questo modo le simulazioni sono eseguite a pari valore di  $\delta_c$ . È interessante notare come in questo caso il carico massimo non sia influenzato mentre possa cambiare leggermente la pendenza iniziale. Dai casi considerati non è stato possibile individuare una tendenza particolare per questa variazione in funzione dei valori di  $c_1$ ,  $c_2$ , che deve essere perciò oggetto di ulteriori approfondimenti.

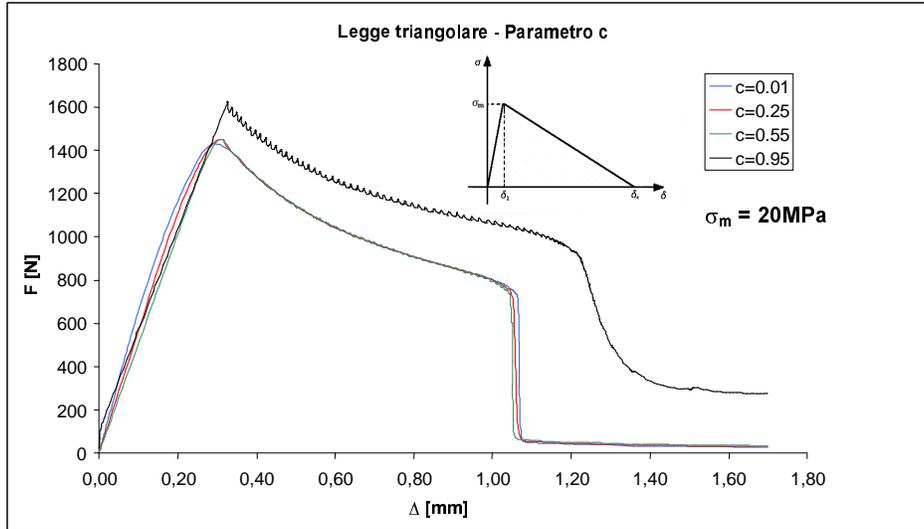


Fig. 7: risultati delle simulazioni con la legge triangolare al variare di  $c$ .

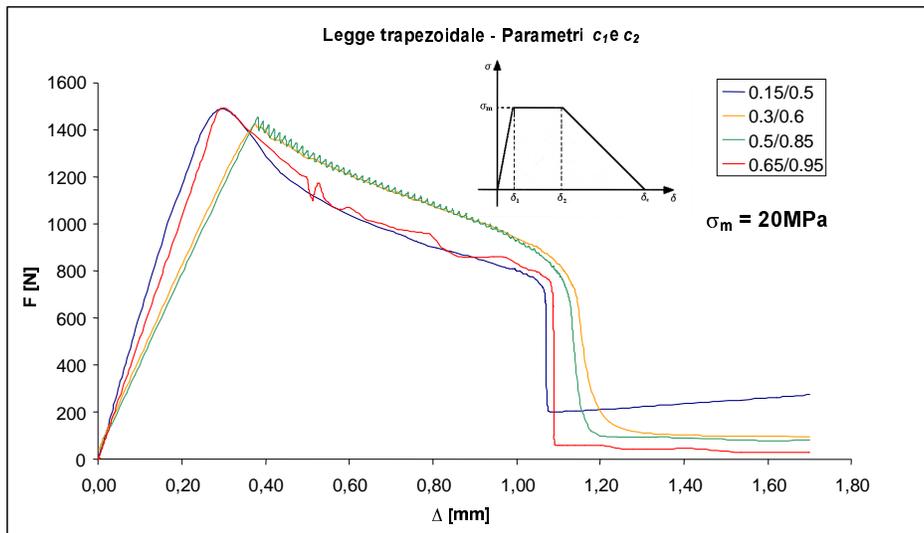


Fig. 8: risultati delle simulazioni con la legge trapezoidale al variare di  $c_1$  e  $c_2$ .

## CONFRONTO CON RISULTATI SPERIMENTALI

In questa parte si sono volute valutare le potenzialità del modello nella simulazione di esperimenti di frattura di giunti DCB condotti in precedenza [13]. In Fig. 8 è mostrato il confronto tra la curva sperimentale e simulata. Le fasi di scarico presenti nella curva sperimentale erano previste per monitorare la propagazione stabile del difetto con il metodo della cedevolezza. Il migliore accordo tra le due curve è stato ottenuto adottando una legge triangolare con  $\Gamma_0 = 550\text{J/m}^2$ ,  $\sigma_m = 4\text{MPa}$  e  $c = 0.01$ . Il valore di  $\Gamma_0$  è pari alla tenacità a frattura  $G_{Ic}$  misurata nell'esperimento riportato in Fig. 8. Nella analisi EF non sono state simulate le fasi di scarico ma si è registrata direttamente la

posizione dell'apice del difetto, definita dalla prima molla che abbia raggiunto un'apertura  $\delta \geq \delta_c$ . Il confronto tra la curva  $\Delta$ -( $a-a_0$ ) sperimentale e simulata è mostrata in Fig. 10. Anche in questo caso l'accordo è sostanzialmente buono fino a 20mm di avanzamento oltre il quale nel modello EF si ha una fase di propagazione a  $\Delta \cong$  costante che nel provino è ritardata probabilmente a causa di meccanismi dissipativi (plasticità, rilassamento viscoso), non contemplati nel modello.

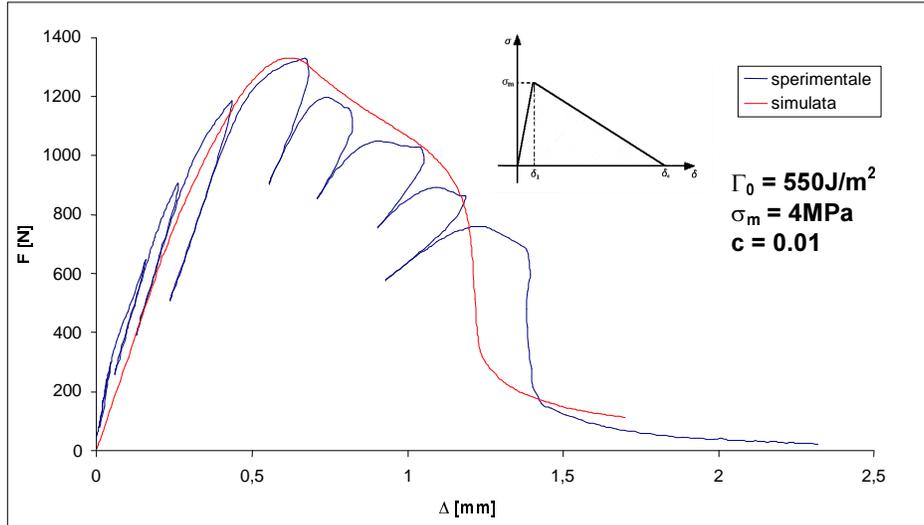


Fig. 9: confronto tra la curva carico-apertura sperimentale [13] e simulata con legge coesiva triangolare.

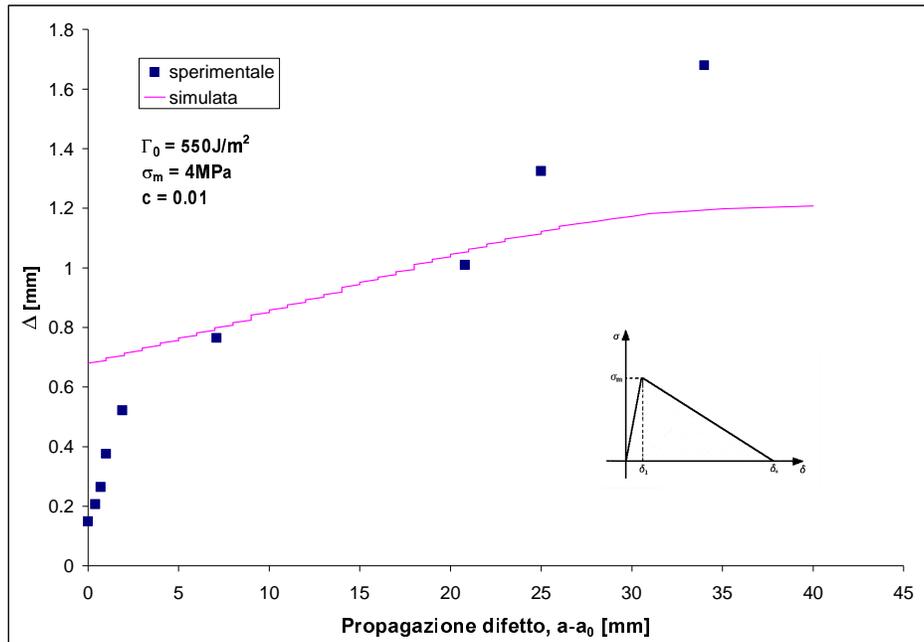


Fig. 10: confronto tra la curva propagazione-apertura sperimentale [13] e simulata con legge coesiva triangolare.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata esaminata la possibilità di simulare la frattura di giunti incollati di tipo DCB con un modello di zona coesiva inserito in una simulazione EF. Si sono dapprima valutati due tipi di legge coesiva: i) ad andamento triangolare e, ii) ad andamento trapezoidale. Le simulazioni effettuate al variare dei parametri della legge coesiva non hanno mostrato apprezzabili differenze tra i due tipi.

Ponendo  $\Gamma_0 = G_{Ic}$  si è calibrato  $\sigma_m$  in modo da ottenere una buona corrispondenza tra il comportamento a frattura sperimentale e simulato di un giunto DCB. La trasferibilità dei parametri così calibrati ad altre tipologie di giunto sarà l'oggetto dei futuri approfondimenti.

## BIBLIOGRAFIA

1. Raymond M.K., "Adhesives get in the groove", Mach. Des., **June 1998**, 70-76.
2. R.D. Adams, J.C. Comyn, W.C. Wake, "Structural Adhesive Joints in Engineering", Chapman & Hall, UK, 1997.
3. A.J. Kinloch, "Adhesion and Adhesives", Chapman and Hall, Londra, UK, 1986.
4. <http://www.merl-ltd.co.uk/materials/adhesion.htm>
5. J.W. Hutchinson, A.G. Evans, "Mechanics of Materials: Top-Down Approaches to Fracture", Acta Mater. 2000, **48** 125-135.
6. I. Mohammed, K.M Liechti, "Cohesive Zone Model of Crack Nucleation at Bimaterial Corners", J. Mech. Phys. Solids 2000, **48** 735-764.
7. V. Tvergaard, J.W. Hutchinson, "The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids", J. Mech. Phys. Solids 1992, **40**, 1377-1397.
8. Q.D. Yang, M.D. Thouless, S.M. Ward, "Numerical Simulation of Adhesively-Bonded Beams Failing with Plastic Deformation", J. Mech. Phys. Solids 1999, **47** 1337-1353.
9. W.G. Knauss, G.U. Losi, "Crack Propagation in a Nonlinearly Viscoelastic Solid with Relevance to Adhesive Bond Failure", J. Appl. Mech. 1993, **60** 793-801.
10. H. Hadavinia, A.J. Kinloch, J.G. Williams, "Finite element analysis of fracture process in composites and adhesively bonded joints using cohesive zone models", Adv. in Fract. and Damage Mech. II, M. Guagliano and M.H. Aliabadi eds., Hoggar, Ginevra, 2001, 445-450.
11. B.F. Sorensen, "Cohesive law and notch sensitivity of adhesive joints", Acta Mater. 2002, **50**, 1053-1061.
12. K.S. Madhusudhana, R. Narashiman, "Experimental and numerical investigation of mixed mode crack growth resistance of a ductile adhesive joint", Eng. Fract. Mech., **69**, 2002, 865-883.
13. A. Pironi, G. Nicoletto, "Comportamento a Frattura di un Adesivo Strutturale", Convegno IGF 2000, Bari, Italia, 2000.